

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES E INDICADORES DE FALTA PARA MINIMIZAR AS PENALIDADES PAGAS POR CONCESSIONÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Luís A. S. Louseiro,* Anselmo B. Rodrigues,* Maria G. da Silva*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMA, Cidade Universitária Dom Delgado, Av. dos Portugueses, 1966 - Vila Bacanga, São Luís - MA, 65080-805
(e-mails: luislouseiro@gmail.com; anselmo.rodrigues@ufma.br; guia.maria@ufma.br)

Abstract: The main objective of this paper is to propose a methodology for the allocation of switches and fault indicators in radial power distribution networks. The allocation of these devices was carried out with the simultaneous minimization of costs associated with: installation of equipment, interruption of energy supply and penalties for violations with targets for the SAIDI (System Average Interruption Duration Index) index. Penalties and interruption costs were estimated considering technical constraints during load transfers, i.e., voltage and loading limits. The SAIDI probability distribution, used in the estimation of penalties, was obtained through Monte Carlo Simulation (MCS) and surrogate models based on Lognormal and Pearson distributions. The minimization of three components of the objective function was performed using a multiobjective Genetic Algorithm based on Pareto Theory. The test results on the RBTS bus 4 system demonstrate that the proposed approach is more effective than the conventional ones (minimization of interruption and installation costs) with regard to the benefit/cost ratio. Furthermore, it can be concluded that the surrogate models have good accuracy and low computational cost compared to the MCS.

Resumo: O principal objetivo deste artigo é propor uma metodologia para a alocação de chaves e indicadores de falta em redes de distribuição radiais. A alocação destes dispositivos foi realizada através da minimização simultânea dos custos associados com: instalação dos equipamentos, interrupção do fornecimento de energia e multas devido a transgressão nas metas para o índice DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). A estimação das penalidades e custos de interrupção foram realizadas considerando-se restrições técnicas durante as transferências de carga, isto é, limites de tensão e carregamento. A distribuição de probabilidade do DEC, usada na estimação das penalidades, foi obtida através da Simulação Monte Carlo (SMC) e modelos substitutos baseados nas distribuições Lognormal e Pearson. A minimização das três componentes da função objetivo foi realizada usando-se um algoritmo Genético multiobjetivo baseado na teoria de Pareto. Os resultados dos testes no sistema RBTS barra 4 demonstraram que a técnica proposta é mais eficaz que as metodologias convencionais (minimização dos custos de instalação e interrupção) com relação a razão benefício/custo. Portanto, pode-se concluir que os modelos substitutos usados na estimação das penalidades têm boa precisão e baixo custo computacional comparados à SMC.

Keywords: Reliability; Optimal Allocation; Genetic Algorithm; Multiobjective Optimization; Switches, Fault Indicators.

Palavras-chaves: Confiabilidade; Alocação Ótima; Algoritmo Genético; Otimização Multiobjetivo; Chaves; Indicadores de Falta.

1. INTRODUÇÃO

As exigências regulatórias para atender metas para índices de qualidade e a maior conscientização dos consumidores sobre problemas de qualidade de energia estão forçando as concessionárias de distribuição a desenvolverem procedimentos e estratégias para maximizar a qualidade do fornecimento de energia com o mínimo custo possível. Um dos principais distúrbios de qualidade de energia são as interrupções no fornecimento de energia. A duração e a frequência (número de interrupções em um dado período) são usados como parâmetros para se definir índices de confiabilidade nodais (para pontos de carga) e coletivos para redes de distribuição. Desta forma, existem dois paradigmas para maximizar a confiabilidade da rede de distribuição: (i) mitigar as causas das falhas; (ii) reduzir o impacto das falhas na rede elétrica. A mitigação das causas das falhas está associada com a implementação das seguintes estratégias: podas de árvores, guardas contra animais, instalação de barreiras em postes contra abalroamentos, etc. Por outro lado, a redução do impacto das falhas está relacionada com as seguintes técnicas:

instalação de proteções, alocação de chaves manuais e automáticas, aplicação de indicadores de falta, etc. Muitas técnicas de redução do impacto das falhas estão associadas com o processo de restauração do fornecimento de energia, por exemplo: a alocação de chaves e indicadores de falta. Consequentemente, estas estratégias são úteis para melhorar índices de confiabilidade associados com a duração das interrupções e, consequentemente, reduzir as penalidades devido a transgressões nas suas respectivas metas. Este artigo está centrado no estudo de técnicas de mitigação do impacto das falhas através da instalação de chaves e indicadores de falta. Desta forma, será realizada uma revisão bibliográfica sobre a aplicação destas técnicas.

Farajollahi et al. (2019) propõem uma metodologia para a alocação simultânea de indicadores de falta e chaves seccionadoras. Estes equipamentos são alocados com o objetivo de minimizar os custos de instalação, manutenção dos equipamentos e de interrupção no fornecimento de energia. Estes custos foram minimizados através da solução de um problema de programação inteira mista.

Assis et al. (2015) propuseram uma metodologia de otimização para alocar chaves em redes de distribuição com topologia radial. A metodologia proposta considera a instalação de chaves manuais e automáticas para seccionamento e interligação dos alimentadores. A técnica introduzida por estes autores tem como objetivo minimizar os custos de alocação e energia não fornecida sujeito a restrições de confiabilidade e capacidade dos circuitos. A solução deste problema de otimização foi obtida usando-se o conceito de algoritmos meméticos.

Shahsavari et al. (2014) introduziram uma metodologia multiobjetivo para a alocação de indicadores de falta em redes de distribuição. Os locais de instalação dos indicadores são determinados considerando-se os efeitos dos dispositivos de controle e proteção existentes sobre o tempo de restauração dos consumidores. As componentes da função multiobjetivo definida por Shahsavari et al. (2014) estão associadas com: custos de interrupção, custos de instalação e manutenção dos indicadores de falta, e minimização dos índices de confiabilidade associados com a duração das interrupções. O problema de otimização resultante é resolvido através de algoritmo de otimização de enxame de partículas multiobjetivo combinado com um método de tomada de decisão nebulosa para selecionar a melhor solução a partir do conjunto Pareto de soluções ótimas

A partir da revisão bibliográfica, observa-se que a solução do problema de alocação de chaves e indicadores de falta foi realizada usando-se algoritmos meta-heurísticos e de programação matemática com o objetivo de maximizar índices de confiabilidade convencionais (DEC, custos de interrupção e energia não fornecida). Porém, não há referências na literatura associadas com a alocação destes componentes considerando-se os seguintes aspectos: (i) restrições de rede (limites de tensão e carregamento dos circuitos) durante as transferências de carga no processo de restauração; (ii) penalidades devido a transgressões nas metas para os índices de confiabilidade. É importante mencionar que as penalidades só podem ser calculadas a partir das distribuições de probabilidade dos índices de confiabilidade. Geralmente, as distribuições de probabilidade dos índices de confiabilidade são estimadas via Simulação Monte Carlo (SMC) (Billinton & Li, 1994; Brown, 2008). Contudo, este método tem alto custo computacional. O custo computacional da solução do problema de alocação de chaves torna-se ainda mais elevado devido a necessidade de realizar estudos de fluxo de potência na simulação do processo de restauração de falhas em cada componente. O estudo de fluxo de potência permite identificar a factibilidade de uma transferência de carga com relação as restrições de rede.

O principal objetivo deste artigo é o desenvolvimento de um método para realizar a alocação de chaves e indicadores de falta para minimizar os custos associados com: a interrupção do fornecimento de energia, perdas de receita devido a multas e instalação e manutenção de equipamentos. O desenvolvimento deste método foi realizado considerando-se a inclusão de restrições de rede na estimação dos índices de confiabilidade. O custo

computacional da solução do problema de alocação de chaves e localizadores de falta foi reduzido usando-se modelos substitutos baseados nas distribuições lognormal e de Pearson. As localizações das chaves e dos indicadores são determinadas usando-se um Algoritmo Genético multiobjetivo baseado na teoria Pareto. A metodologia proposta foi testada no sistema RBTS barra 4 (Billinton et al., 1994). Os resultados obtidos demonstraram que as restrições de rede têm impacto significativo nos índices de confiabilidade. Além disso, a alocação de chaves e indicadores de falta obtidos pela metodologia proposta obtiveram reduções expressivas nas penalidades e nos custos de interrupção com boa relação benefício/custo.

2. CÁLCULO DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

Os índices de confiabilidade da rede de distribuição são estimados através da emulação do processo de gerenciamento da interrupção causado pela falha de cada componente da rede. Os principais passos deste processo são:

- i) Resposta da proteção: identificação do dispositivo de proteção que eliminou a falta.
- ii) Localização da falta: utiliza informação de dispositivo de sinalização (indicadores de falta e seccionadores automáticos) para identificar o componente defeituoso.
- iii) Restauração à montante: o dispositivo de seccionamento à montante da falta é aberto e a proteção é fechada para restaurar o fornecimento de energia para todos os consumidores entre estes dois dispositivos.
- iv) Restauração à jusante: chaves seccionadoras à jusante da falta são abertas e chaves Normalmente Abertas (NA) à jusante destes dispositivos são fechadas para transferir carga para alimentadores adjacentes.
- v) Reparo: o componente falhado é consertado.

O processo de localização da falta citado no passo (ii) está relacionado com a determinação da área de patrulha. Esta determinação é realizada identificando-se primeiramente o indicador de falta ou seccionador automático mais distante da subestação que foi acionado pela corrente de falta no componente defeituoso. Esta identificação é realizada usando-se uma busca à montante partindo-se do componente que sofreu a falta. Em seguida, realiza-se uma busca à jusante do indicador de falta ou do seccionador automático identificado. Esta busca cessa quando são encontrados os seguintes tipos de dispositivos: proteções, chaves automáticas e indicadores de falta. Estes dispositivos reduzem a área de atuação da falta devido ao fato de que eles não foram acionados pela passagem da corrente de falta. Caso não haja o acionamento de nenhum indicador de falta ou seccionador automático, então a área de patrulha é definida realizando-se uma busca à jusante do dispositivo de proteção que eliminou a falta. Esta busca cessa quando são localizados os seguintes dispositivos: fusíveis e seccionadores automáticos. Novamente, estes dispositivos limitam a área de patrulha devido ao fato de não serem acionados pela corrente de falta. A área de patrulha é definida pelos dispositivos localizados nas duas

buscas à jusante descritas acima. Estes dispositivos formam o conjunto Ω_i^{pat} , ou seja, o conjunto de ramos que será patrulado para a localização da falta no ramo i . Desta forma, pode-se calcular o tempo de localização da falta de acordo com (1).

$$t_i^{loc} = \sum_{j \in \Omega_i^{pat}} \frac{L_j}{v^{pat}} + t^{pre} \quad (1)$$

Onde: t_i^{loc} é o tempo de localização da falta no ramo i ; L_j é o comprimento do ramo j ; v^{pat} é a velocidade das equipes durante o patrulhamento e t^{pre} é o tempo médio de preparação das equipes de manutenção.

O modelamento de restrições de rede (carregamento máximo das seções dos alimentadores e limites das tensões nodais) é considerado no passo (iv) do gerenciamento da interrupção. Na restauração à jusante pode haver mais de uma chave NA para a transferência de carga. Consequentemente, realiza-se um processo de seleção da chave NA cujo critério é escolher a chave que restaura o maior número de consumidores sem violar restrições de rede. A identificação da violação nas restrições de rede é realizada executando-se um fluxo de potência para cada chave NA candidata. Neste artigo, um algoritmo de varredura regressiva/progressiva, baseado no método de soma de correntes (Shirmohammadi, 1988), é usado para calcular as tensões nodais nos cenários de reconfiguração resultantes da restauração à jusante. A duração da interrupção para os consumidores restaurados pela transferência de carga é igual ao tempo de localização da falta mais o tempo de chaveamento. Por outro lado, a duração da interrupção dos consumidores que não são transferidos é igual ao tempo de localização mais o tempo de reparo do componente falhado.

A partir dos passos (i)-(v) descritos acima, é possível obter o índice DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) considerando a seguinte formulação matricial:

$$DEC = AU \quad (2)$$

Onde:

$$A = [A^{rep} \quad A^{chv}]$$

$$U = \begin{bmatrix} U^{rep} \\ U^{chv} \end{bmatrix} \text{ é o vetor de indisponibilidades anuais.}$$

$$A^{rep} = (1/N_{tot}^{cons})(N^{cons})^T W^{rep}$$

$$A^{chv} = (1/N_{tot}^{cons})(N^{cons})^T W^{chv}$$

$$N^{cust} = [N_1^{cons} \quad \dots \quad N_{N^{PC}}^{cons}]^T$$

O sobrescrito T em uma matriz ou vetor, como em $(N^{cons})^T$, denota a transposta.

N_i^{cons} é o número de consumidores no ponto de carga i .

N^{PC} é o número de pontos de carga da rede de distribuição.

N^{cons} é vetor do número de consumidores.

$N_{tot}^{cons} = \sum_{i=1}^{N^{PC}} N_i^{cons}$ é o número total de consumidores da rede de distribuição.

As matrizes W^{rep} e W^{chv} indicam os componentes nos quais o tempo de restauração é igual ao tempo de localização mais o tempo de chaveamento ou de reparo. Os elementos das matrizes W^{rep} e W^{chv} são definidos abaixo.

$W_{ij}^{rep} = 1$, se o ponto de carga i só é restaurado após o reparo do componente j ; $W_{ij}^{rep} = 0$, caso contrário.

$W_{ij}^{chv} = 1$, se o ponto de carga i é restaurado após ações de chaveamento à montante ou à jusante da falha no componente j ; $W_{ij}^{chv} = 0$, caso contrário.

N^{comp} é o número de componentes.

N_c^{fal} é uma variável aleatória com distribuição de Poisson associada com o número de falhas no componente c .

$t_{f,c}^{chv}$, $t_{f,c}^{rep}$ e $t_{f,c}^{loc}$ são variáveis aleatórias exponencialmente distribuídas associadas com os tempos de chaveamento, reparo e localização para a falha f no componente c , respectivamente.

$U_i^{rep} = \sum_{f=0}^{N_i^{fal}} (t_{f,i}^{loc} + t_{f,i}^{rep})$ é uma soma aleatória associada com os tempos de localização e reparo na qual o número de termos (N_i^{fal}) está associado com o número de falhas no componente i . Este número é representado pela distribuição de Poisson. Em outras palavras, U_i^{rep} é a indisponibilidades anual (duração acumulada) devido aos tempos de reparo e localização do componente i .

$U^{rep} = [U_1^{rep} \quad \dots \quad U_{N^{comp}}^{rep}]^T$ é vetor de somas aleatórias associado com tempos de reparo e localização.

$U_i^{chv} = \sum_{f=0}^{N_i^{fal}} (t_{f,i}^{loc} + t_{f,i}^{cha})$. é uma soma aleatória associada com tempos de localização e chaveamento. Isto é, U_i^{chv} é a indisponibilidades anual (duração acumulada) devido aos tempos de chaveamento e localização do componente i .

$U^{chv} = [U_1^{chv} \quad \dots \quad U_{N^{comp}}^{chv}]^T$ é o vetor de somas aleatórias associado com tempos de chaveamento e localização.

O método analítico convencional para estimar índices de confiabilidade da rede de distribuição consiste basicamente no cálculo do valor esperado de (2). Consequentemente, o valor esperado do DEC é dado por:

$$E[DEC] = AE[U] \quad (3)$$

Onde:

$$E[U] = \begin{bmatrix} E[U^{rep}] \\ E[U^{chv}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \circ (MTTL + MTTR) \\ \lambda \circ (MTTL + MTTS) \end{bmatrix}$$

O símbolo \circ denota o produto de Hadamard.

λ , $MTTR$, $MTTS$ e $MTTL$ são vetores associados com a taxa de falha, tempo médio de reparo ("MTTR-Mean Time

to Repair”), tempo médio de chaveamento (“MTTS-Mean Time to Switch”) e tempo médio de localização (“MTTL-Mean Time to Locate”) dos componentes, respectivamente.

Por outro lado, a SMC gera uma amostra de valores do DEC para um período anual através do sorteio dos vetores de somas aleatórias U^{rep} e U^{chv} . Este sorteio é realizado amostrando-se o número de falhas (baseado na distribuição de Poisson) e os tempos de localização, chaveamento e reparo (baseados na distribuição exponencial) para cada componente, com o objetivo de definir suas respectivas somas aleatórias anuais. Desta forma, o valor esperado do SAIDI pode ser estimado usando-se a definição de valor médio como se segue:

$$\tilde{E}[DEC] = \frac{1}{N^{year}} \sum_{y=1}^{N^{year}} DEC^y \quad (4)$$

Onde:

$\tilde{E}[DEC]$ é o valor médio da amostra do índice DEC gerada via SMC.

N^{year} é o tamanho da amostra gerada via simulação SMC.

$DEC^y = [A^{rep} \ A^{sw}] \begin{bmatrix} U^{rep,y} \\ U^{chv,y} \end{bmatrix}$ é o valor amostrado do DEC para o ano y .

$U^{rep,y}$ and $U^{chv,y}$ são os vetores de somas aleatórias amostrados associados com U^{rep} and U^{chv} , respectivamente.

A amostra do índice DEC pode ser usada para gerar vários índices estatísticos, tais como: distribuições de probabilidade, desvio padrão, percentis e riscos de violação. É importante mencionar que as penalidades associadas com violações nas metas do DEC só podem ser estimadas através da sua respectiva distribuição de probabilidade (Brown, 2008). Entretanto, o custo computacional da SMC é alto devido a necessidade de amostrar somas aleatórias para cada componente e devido o produto de uma matriz por um vetor exigido para calcular o DEC. Uma alternativa para contornar esta dificuldade é usar modelos substitutos para gerar distribuições de probabilidade aproximadas para o índice DEC (Lim et al., 2009). Estas distribuições preservam as mesmas tendências e vieses da distribuição exata do DEC com relação a alocação de chaves e indicadores de falta. Conseqüentemente, os modelos substitutos são muito úteis na alocação destes dispositivos. Estes modelos constroem as distribuições aproximadas do DEC com base nos seus cumulantes. Os cumulantes do DEC são obtidos a partir dos cumulantes de uma combinação linear de somas aleatórias. Desta forma, os cumulantes do DEC são dados por:

$$\gamma_k(SAIDI) = \sum_{c=1}^{N^{comp}} (A_c^{rep})^k \gamma_k(U_c^{rep}) + \sum_{c=1}^{N^{comp}} (A_c^{chv})^k \gamma_k(U_c^{chv}) \quad (5)$$

Onde:

$\gamma_k(DEC)$, $\gamma_k(U_c^{rep})$ and $\gamma_k(U_c^{chv})$ são os k -ésimos cumulantes do DEC, U_c^{rep} and U_c^{chv} , respectivamente. Miller & Childers (2012) apresentam uma explanação detalhada sobre o cálculo dos cumulantes de $\gamma_k(U_c^{rep})$ and $\gamma_k(U_c^{sw})$.

A ordem máxima dos cumulantes que deve ser calculada depende da distribuição substituta usada para modelar o DEC. Neste artigo, as variações aleatórias no DEC são modeladas através das distribuições Lognormal (Brown, 2008) e de Pearson (Billinton & Goel, 1986). A distribuição Lognormal requer dois cumulantes e a de Pearson quatro. As técnicas de estimação dos parâmetros das distribuições Lognormal e Pearson, a partir dos seus cumulantes, são descritas nas referências (Brown, 2008) e (Billinton & Goel, 1986), respectivamente.

Uma vez que a distribuição de probabilidade do DEC é obtida, podem-se estimar as penalidades associadas com esse índice como segue:

$$\tilde{E}[RP] = \frac{1}{N^{year}} \sum_{y=1}^{N^{year}} RP(DEC^y) \quad (6)$$

Onde:

$\tilde{E}[RP]$ é o valor esperado (médio) para a penalidade/recompensa associada com o DEC.

$$RP(DEC^y) = \begin{cases} V_{RP} \times cr, & \text{se } DEC^y \leq wr + cr/sr \\ V_{RP} \times (DEC^y - wr)sr, & \text{se } DEC^y \in (wr + cr/sr, wr) \\ 0, & \text{se } DEC^y \in [wr, wp] \\ V_{RP} \times (DEC^y - wp)sp, & \text{se } DEC^y \in (wp, wp + cp/sp) \\ V_{RP} \times cp, & \text{se } DEC^y \geq wp + cp/sp \end{cases}$$

cr (cp), sr (sp) and wr (wp) representam o valor máximo, a inclinação e o limiar da zona de recompensa (penalidade), respectivamente.

V_{RP} é o valor base para o pagamento da recompensa/penalidade.

$dSAIDI$ é uma mudança infinitesimal no índice DEC.

A partir da equação (6), pode-se notar que a estimação das penalidades via modelos substitutos também é realizada através da amostragem do DEC. Contudo, esta amostragem é realizada gerando-se apenas um número aleatório para cada elemento da amostra de acordo com a distribuição do modelo substituto: Lognormal ou Pearson. Este procedimento, reduz consideravelmente o custo computacional da estimação da penalidade com relação a SMC convencional, pois não é necessário sortear somas aleatórias para cada componente e nem realizar o produto de uma matriz por um vetor para calcular o DEC. Além disso, este procedimento evita o uso de técnicas de integração numérica (tais como o método trapezoidal) para determinar as penalidades.

Outro índice de confiabilidade bastante usado na solução do problema de alocação de chaves e indicadores de falta é o custo de interrupção. O valor esperado do custo de interrupção anual ($E[C^{int}]$) é calculado de acordo com (7).

$$E[C^{int}] = \sum_{i=1}^{N^{PC}} \sum_{j=1}^{N^{comp}} \sum_{t=1}^{N^{tipo}} P_{it}^{kw} \times C_{i,j,t}^{int} \quad (7)$$

Onde:

P_{it}^{kw} é a potência ativa associada com o consumidor do tipo t no ponto de carga i .

λ_j é o elemento j do vetor λ .

$C_{i,j,t}^{int} = \lambda_j [W_{ij}^{rep} f_t^{int}(t_j^{rep} + t_j^{loc}) + W_{ij}^{chv} f_t^{int}(t_j^{chv} + t_j^{loc})]$ é o custo de interrupção em \$/kW para um consumidor do tipo t , conectado ao ponto de carga i e devido a falha no componente j .

N^{tipo} é o número de tipos de consumidores (residencial, industrial, comercial, rural, etc.).

$f_t^{int}(d)$ é uma função que relaciona a duração da interrupção d com o custo de interrupção normalizado para os consumidores do tipo t . As funções dos custos de interrupção para os tipos de consumidores são definidas a partir de dados estatísticos obtidos através de pesquisas (entrevistas) com os consumidores (Billinton & Li, 1994).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Formulação Convencional para o Problema de Alocação de Chaves e Indicadores de Falta.

Geralmente, o problema de alocação de seccionadoras e indicadores de falta tem como objetivo minimizar os custos de interrupção e de instalação destes equipamentos. Este problema é matematicamente formulado como se segue:

$$\text{Minimizar } \{C_{tot}^{int}, C^{eq}\} \quad (8)$$

Onde:

$$C^{eq} = C^{IF} + C^{chvm} + C^{chva}$$

$$C^{IF} = \sum_{i=1}^{N^{IF}} (C_{inst_i}^{IF} + \sum_{p=1}^{N^{proj}} C_{man_i}^{IF})$$

$$C^{chvm} = \sum_{i=1}^{N^{chvm}} (C_{inst_i}^{chvm} + \sum_{p=1}^{N^{proj}} C_{man_i}^{chvm})$$

$$C^{chva} = \sum_{i=1}^{N^{chva}} (C_{inst_i}^{chva} + \sum_{p=1}^{N^{proj}} C_{man_i}^{chva})$$

$$C_{tot}^{int} = \sum_{p=1}^{N^{proj}} \sum_{i=1}^{N^{PC}} \sum_{j=1}^{N^{comp}} \sum_{t=1}^{N^{tipo}} (1 + F^{CC})^p P_{it}^{kw} \times C_{i,j,t}^{int}$$

C^{eq} é o custo associado com equipamentos.

C^{IF} , C^{chvm} e C^{chva} são os custos associados com indicadores de falta, chaves manuais e chaves automáticas, respectivamente.

F^{CC} é o fator de crescimento de carga anual.

N^{proj} é o número de anos no horizonte de projeto.

C_{tot}^{int} é o custo de interrupção total para o horizonte do projeto.

N^{IF} , N^{chvm} e N^{chva} são os números de indicadores de falta, chaves manuais e chaves automáticas, respectivamente.

$C_{inst_i}^{IF}$, $C_{inst_i}^{chvm}$ e $C_{inst_i}^{chva}$ são os custos de instalação de indicadores de falta, chaves manuais e chaves automáticas, respectivamente.

$C_{man_i}^{IF}$, $C_{man_i}^{chvm}$ e $C_{man_i}^{chva}$ são os custos de instalação de indicadores de falta, chaves manuais e chaves automáticas, respectivamente.

3.2 Formulação Proposta para o Problema de Alocação de Chaves e Indicadores de Falta.

Em alguns modelos publicados na literatura desconsidera-se a função das seccionadoras automáticas como indicador de falta. Além disso, é comum ignorar as restrições de rede no cálculo dos índices de confiabilidade. Estes pontos são cruciais para encontrar soluções mais próximas da realidade, visto que não é possível fazer restaurações à jusante sem avaliar a factibilidade das restrições operacionais da rede de distribuição.

Penalidades e bônus, devido as transgressões em metas para os índices de confiabilidade, também não são explorados pela literatura atual. Isto deve-se principalmente ao alto custo computacional para obter as distribuições de probabilidade dos índices de confiabilidade via SMC. Porém, os custos associados com as penalidades por descumprimento das metas para os índices de confiabilidade são mais elevados do que os custos associados as interrupções. Desta forma, torna-se crucial estimar essas penalidades e tentar mitiga-las através da instalação de dispositivos seccionadores e indicadores de falta. A formulação proposta para o problema de alocação de chaves seccionadoras e indicadores de falta é mostrada abaixo:

$$\text{Minimizar } \{C_{tot}^{int}, C^{eq}, C_{tot}^{PR}\} \quad (9)$$

Onde:

$\tilde{E}[RP_p]$ é o valor esperado da penalidade para o ano p do horizonte de projeto.

$C_{tot}^{PR} = \sum_{p=1}^{N^{proj}} \tilde{E}[RP_p]$ é o custo total das penalidades para o horizonte de projeto.

3.3 Algoritmo Genético

É importante comentar os seguintes aspectos relativos aos problemas de otimização definidos em (8) e (9):

i) A introdução da penalidade na função objetivo aumentou consideravelmente a complexidade do problema, pois agora é necessário se obter a distribuição de probabilidade do DEC através da SMC ou dos modelos substitutos baseados nas distribuições Lognormal ou de Pearson.

ii) A modelagem de restrições de rede durante as transferências de carga à jusante é realizada de forma implícita através das matrizes, pois quando uma transferência de carga é factível, os tempos de restauração dos pontos de carga envolvidos na transferência passam a ser iguais ao tempo de chaveamento. Caso contrário, os tempos de restauração passam a ser iguais ao tempo de reparo.

iii) O crescimento anual da carga reduz a capacidade de transferência de carga da rede de distribuição e aumenta o impacto das restrições de rede no índice DEC e nas penalidades.

As complexidades adicionais introduzidas pela inclusão das penalidades e restrições de rede no modelo proposto evidenciam que as técnicas mais adequadas para a solução do modelo proposto para alocação de chaves e localizadores de falta são os algoritmos meta-heurísticos. Neste artigo, o algoritmo meta-heurístico escolhido para a solução do problema de alocação de chaves foi o Algoritmo Genético multiobjetivo baseado na Teoria Pareto. Este algoritmo tem sido aplicado de forma bem sucedida em outros problemas de otimização da confiabilidade (Brown, 2008).

A representação cromossômica usada neste artigo para a solução do problema de alocação de chaves e indicadores de falta é ilustrada com o auxílio do sistema da Fig. 1. Nesta figura, os locais candidatos são identificados através de losangos de cor cinza nos terminais de cada seção do tronco. A partir desta figura, pode-se notar que somente o terminal do lado da carga é candidato na primeira seção de cada alimentador, pois já existe um dispositivo instalado do lado da fonte: o disjuntor de saída. Desta forma, a dimensão de cada solução será igual ao número de locais candidatos. O valor 0 indica que não há equipamento inserido no local candidato, o valor 1 representa o indicador de falta, 2 representa chaves manuais e 3, chaves automáticas.

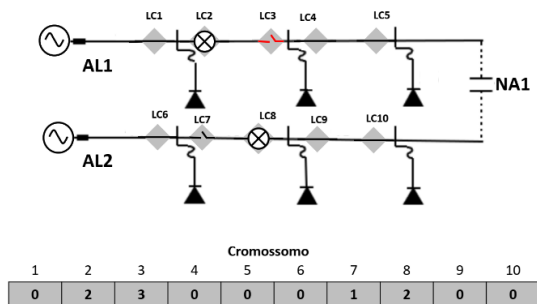


Fig.1 Exemplo de cromossomo codificado.

4. RESULTADOS DOS TESTES

4.1 Descrição do sistema-teste e definição dos casos de estudo

Os modelos propostos para a alocação de chaves e indicadores de falta foram testados no sistema RBTS (“Roy Billinton Test System”) barra 4 (Billinton et al., 1991). Todos os modelos de alocação foram implementados usando a linguagem de programação do MATLAB. O sistema RBTS original não possui dados para estudos de fluxo de potência. Consequentemente, foram adotados os seguintes dados para a modelagem de restrições de rede no processo de restauração à jusante:

- i) Condutor dos troncos: 336,4; 30/7; ACSR; resistência = 0,306 ohms/milha, GMR = 0,0244 ft, capacidade = 530 A.
- ii) Condutor das laterais: 1/0; ACSR, resistência = 1,12 ohms/milha; GMR = 0,00446 ft; capacidade = 230 A.

iii) Geometria dos condutores: $D_{ab} = 2,5 \text{ ft}$; $D_{bc} = 4,5 \text{ ft}$; $D_{ca} = 7,0 \text{ ft}$.

iv) Transformadores: 1500 kVA; 11 kV/415 V; $Z\% = 5,5\%$.

v) Tensão na barra da subestação: 1,01875 pu.

vi) Tensão de base: 11 kV.

vii) Potência de base: 10 kVA.

viii) Fator de potência das cargas: 0,95.

Os dados dos custos de compra, instalação e manutenção dos equipamentos foram obtidos a partir da referência (FARAJOLLAHI et al., 2019). Adicionalmente, a referência (BILLINTON e LI, 1994) forneceu os dados dos custos de interrupção dos tipos de consumidores.

A Fig. 2 mostra a função de penalidade resultante ($RP(DEC^y)$) utilizada nos testes com o sistema RBTS.

Os valores dos parâmetros do Algoritmo Genético usados para alocar chaves e indicadores de falta são especificados abaixo:

- i) Taxa de Reprodução: os 50% mais adaptados entre si;
- ii) Tipo de reprodução: uniforme com sorteio de cromossomos;
- iii) Taxa de Mutação: 15%;
- iv) Tamanho da População: 50 Indivíduos;
- v) Número de gerações: 100.

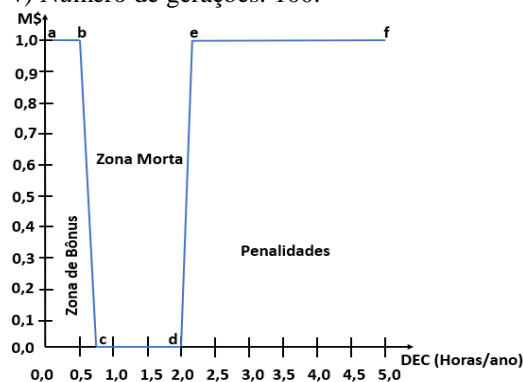


Fig. 2 Função de Penalidade para o índice DEC.

A metodologia proposta para alocação de chaves e indicadores de falta foi validada e comparada com metodologias convencionais de alocação considerando-se os seguintes casos de estudo:

- a) Caso #0 (Caso Base): configuração do sistema RBTS sem a instalação de chaves manuais ou automáticas e indicadores de falta nas seções do tronco. Os limites de tensão e carregamento foram ignorados na estimação dos índices de confiabilidade.
- b) Caso #1 (Alocação Convencional): este caso está associado com a alocação de chaves e indicadores de falta para minimizar os custos de interrupção para os tipos de consumidores e de instalação e manutenção dos equipamentos. Todos os modelos convencionais de alocação de chaves e indicadores publicados na literatura ignoram as restrições de rede. Devido a isso, foram projetados três subcasos associados com o Caso #1:

b-1) Caso #1.1: minimização dos custos de interrupção, instalação e manutenção dos equipamentos desprezando as restrições de rede.

b-2) Caso #1.2: minimização dos custos de interrupção, instalação e manutenção dos equipamentos, ignorando-se as restrições de rede durante a otimização e incluindo-se estas restrições na análise pós-otimização.

b-3) Caso #1.3: minimização dos custos de interrupção e de instalação e manutenção dos equipamentos com a inclusão de restrições de rede durante a otimização.

c) Caso #2: minimização das penalidades e dos custos de interrupção dos consumidores, instalação e manutenção dos equipamentos com a inclusão de restrições de rede durante a otimização. Neste caso a estimação das penalidades é realizada via SMC, método de Pearson e Lognormal.

4.2 Análise dos resultados obtidos com os casos de estudo

A Tabela 1 apresenta os custos de equipamentos, interrupção e penalidade associados com os casos de estudo. A terceira e a quarta linhas da Tabela 1 mostram os custos associados com os casos #1.1 e #1.2. As penalidades dos casos 1.1 e 1.2 foram calculadas após a otimização usando-se a SMC. Comparando-se os casos 0, 1.1 e 1.2 pode-se observar que a metodologia convencional obteve melhorias nos custos de interrupção e penalidades. Pode-se observar também que a inclusão das restrições de rede degradou significativamente a solução ótima obtida pelo modelo convencional. Por exemplo, os aumentos nos custos de interrupção e de penalidades devido a modelagem de restrições de redes foram iguais a 88% e 55%, respectivamente. Em outras palavras, a redução efetiva nos custos de interrupção e penalidades com a modelagem de restrições de rede foi de apenas 7% e 11%, respectivamente. Este resultado demonstra quantitativamente que as restrições de rede não podem ser desconsideradas na alocação de chaves e indicadores de falta.

A Tabela 2 mostra o número de dispositivos alocados para os casos de estudo. Analisando os dados desta tabela, pode-se observar que a metodologia proposta alocou mais dispositivos do que a metodologia convencional. Este resultado é devido a introdução de um novo termo na função objetivo: a penalidade devido a transgressões na meta para o índice DEC.

A sétima linha da Tabela 1 mostra as penalidades e os custos de equipamentos e de interrupção para o caso de estudo #2. A partir desta tabela pode-se observar que a metodologia proposta obteve reduções de cerca de 15% e 24% no valor da penalidade com relação aos casos #1.2 (modelo convencional) e #0 (caso base), respectivamente. Esta redução nas penalidades também resultou em uma diminuição de cerca de 7% nos custos de interrupção com relação ao Caso #1.2. Todavia, os custos de equipamentos associados com o método proposto (Caso #2) são cerca de 51% maiores com relação ao modelo convencional (Caso #1.2). Aparentemente, este resultado parece indicar que o método proposto não é eficaz com relação ao custo comparado com a metodologia convencional.

Tabela 1. Custos associados com os casos #0, #1.1, #1.2, #1.3, #2 em dólar

Casos	Custos (\$)		
	Equipamentos	Interrupção	Penalidades
#0	0,00	6.982.588,31	14.069.152,76
#1.1	55.602,78	3.447.060,92	8.128.012,33
#1.2	55.602,78	6.489.026,82	12.565.282,03
#1.3	66.680,72	6.092.660,60	11.166.044,83
#2	84.149,80	6.058.607,88	10.633.788,19

Tabela 2. Número de dispositivos alocados para os casos de estudo

Casos	Tipo do dispositivo		
	Indicador	Chave Manual	Chave Aut.
#0	----	----	----
#1.1	6	12	3
#1.2	6	12	3
#1.3	9	8	4
#2	11	11	6

Desta forma, deve-se realizar uma avaliação mais criteriosa da metodologia proposta com base na relação benefício/custo. Portanto, quanto maior (menor) for a relação benefício/custo melhor (pior) será a alternativa de projeto ou técnica de mitigação. No problema de alocação de chaves e indicadores a relação benefício/custo é dada pelo quociente entre a redução no custo da confiabilidade (penalidades mais os custos de interrupção) com relação ao caso base e os custos dos equipamentos. A partir da Tabela 1, tem-se que as relações custo/benefício para os casos #1.2, #1.3 e #2 são iguais a: 35.7, 48.4 e 51.8, respectivamente. Este resultado demonstra que o modelo proposto obtém uma relação benefício/custo melhor do que o modelo convencional mesmo quando este último é melhorado pela inclusão de restrições de rede na alocação de indicadores e de chaves.

4.2 Análise dos modelos substitutos

A Tabela 3 mostra os custos estimados via SMC e pelos modelos substitutos para o caso de estudo #2.

Tabela 3. Custos estimados pelos modelos substitutos

Custos (USD)	SMC	Pearson	Log-Normal
C^{eq}	84.149,80	87.345,36	59.437,45
C^{int}	6.058.607,88	6.004.512,30	6.089.791,20
C^{PR}	10.633.788,19	10.111.495,37	10.973.016,60
Total	16.776.545,87	16.203.353,03	17.122.245,25

A partir da Tabela 3, pode-se concluir que os custos referentes aos modelos substitutos baseados nas distribuições de Pearson e Lognormal têm boa precisão com relação aos custos calculados via SMC. Por exemplo, os erros relativos percentuais (com relação a SMC) associados

com os custos das penalidades obtidos pelos modelos alternativos de Pearson e Lognormal são iguais a 4,6% e 2,2%, respectivamente.

A Tabela 4 mostra os tempos de CPU dos modelos substitutos e da SMC e também os ganhos e as reduções percentuais destes modelos com relação a SMC. Os resultados apresentados nesta tabela foram obtidos na seguinte plataforma computacional: computador com processador Intel Core i5-7200U de 2.5 GHz, 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 10. A partir desta tabela, pode-se notar que os modelos substitutos são cerca de quatro vezes mais rápidos do que a SMC.

Tabela 4. Tempos de CPU para os modelos substitutos

Método	Tempo (seg.)	Ganho	Redução (%)
SMC	28.376,71	1	100
Pearson	6.668,74	4	76
Lognormal	6.392,68	4	77

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou modelos para a alocação de indicadores de falta e chaves em redes de distribuição de energia elétrica. Esta alocação foi realizada com o objetivo maximizar a confiabilidade e minimizar os custos de instalação das chaves e dos indicadores de falta. Esta alocação foi realizada considerando-se restrições de rede na estimação dos índices de confiabilidade. Os resultados dos testes demonstraram que:

- i) As restrições de rede tem grande impacto nas penalidades para o índice DEC e nos custos de interrupção.
- ii) Os índices de confiabilidade obtidos por modelos convencionais de alocação de chaves e indicadores de falta são significativamente degradados quando as restrições de rede são excluídas do modelo de otimização.
- iii) A alocação de chaves e indicadores de falta obtida pela metodologia proposta obteve reduções significativas nas penalidades e nos custos de interrupção e com razão benefício/custo superior a unidade.
- iv) Os modelos substitutos baseados nas distribuições de Pearson e Lognormal demonstraram boa precisão e reduções expressivas no tempo de CPU com relação a SMC.

8. REFERÊNCIAS

Assis, L. S., Vizcai, J. F., Usberti, F. L., Lyra, C., Cavellucci, C., & Von Zuben, F. J. (2014). *Switch allocation problems in power distribution systems*. IEEE Transactions on Power Systems, 30(1), 246-253.

Billinton, R. & Goel, R. (1986) *An Analytical Approach to Evaluate Probability Distributions Associated with the Reliability Indices of Electric Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1(3), 245-251.

Billinton, R. e Li, W. (1994). *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, New York: Springer.

Brown, R. E. (2008). *Electric power distribution reliability*. Boca Raton: CRC press.

Billinton, R.; Allan, R. N.; Sjarief, I.; Goel, L.; So, K. S., (1991). *A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results*. IEEE Transactions on Power Systems, Maio, pp. 813-820.

Farajollahi, M., Fotuhi-Firuzabad, M., & Safdarian, A. (2019). *Simultaneous placement of fault indicator and sectionalizing switch in distribution networks*. IEEE Transactions on SmartGrid, 10(2), 2278-2287.

Lim, D., Jin, Y., Ong, Y.S., Sendhoff, B. (2009) *Generalizing surrogate-assisted evolutionary computation*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 14(3), 329-355.

Miller, S. & Childers, D. (2012). *Probability and Random Processes*. Waltham: Elsevier.

Shahsavari, A., Mazhari, S. M., Fereidunian, A., Lesani, H. (2014) *Fault Indicator Deployment in Distribution Systems Considering Available Control and Protection Devices: A Multi-Objective Formulation Approach*. IEEE Transactions on Power Systems. 29(5), 2359-2369.

Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A., & Luo, G. X. (1988). *A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks*. IEEE Transactions on power systems, 3(2), 753-762.